

中国式生态现代化发展指数测度研究

王志坚 吴绍鹏 陈枫林 谷 丰

(广东财经大学 统计与数学学院, 广东 广州 510320)

摘要: 中国式现代化坚持走生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路, 生态现代化是中国式现代化的重要组成部分, 是建设人与自然和谐共生的现代化之必须。目前我国尚未形成科学系统的国家生态现代化发展的统计测度, 文章以珠三角城市群为研究对象, 基于经济生态、社会生态、环境生态三个维度构建了 18 个指标体系。在修正数据异常和以马尔可夫方法考察 2019 年经济社会发展出现断点故作为 CRITIC 赋权法的代表性年份基础上, 创造性地将面板数据进行基于截面-个体的全局标准化, 运用加权线性算法构建生态现代化发展指数。在此基础上, 对珠三角的局部和总体的生态现代化发展指数水平用分布动态法、卷积操作等进行时空动态化评估, 并构建 PVAR 模型对生态现代化的三个维度以及发展指数进行脉冲响应分析。文章既完善了中国式现代化的评价指标体系, 又改进了时空尺度分析方法。研究结果表明: 珠三角地区的生态现代化发展呈现螺旋上升发展态势, 发展结构优, 发展活力好, 生态现代化维度之间存在相互影响和促进效用以及维度对自身也有较为积极的促进作用。本文研究结果对把握我国生态现代化发展规律及相关政策制定具有重要参考价值。

关键词: 生态现代化; 统计测度; 时空尺度分析; 脉冲响应; 全局标准化

中图分类号: C811 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-537X (2024) 02.0053-14

DOI: 10.16722/j.issn.1674-537x.2024.02.010

一、引言

(一) 研究背景

改革开放以来, 我国经济高速发展。现代化进程取得巨大成就的同时造成了严重的生态环境问题: 生态环境污染严重, 生态系统结构遭到破坏^[3]。生态环境治理问题的严峻凸显了走生态现代化之路的必然性。党的二十大报告中, 对生态现代化的任务目标作出了明确的安排部署, 推动生态现代化进程具有重要意义。

珠三角作为中国规模最大的高新技术产业带, 集聚了国内经济第一大省广东 53.35% 的人口及 79.67% 的经济总量。绿色发展总体水平较高, 空气质量、能耗降低率等多项生态环境指标上表现良好, 领先于京津冀和长三角, 凸显绿色转型的力度较大。本文选取珠三角城市群为例, 研究中国式生态现代化, 具有一定的代表性和创新性。

(二) 文献综述

1. 生态现代化的理论核心

1985 年德国学者胡伯在“现代化”传统意义基础上, 正式提出生态现代化理论, 核心在于发挥生态优势, 实现经济发展和环境保护双赢。郁庆治^[8]认为, 实现可持续绿色发展需要技术革新转

向, 生产与产品从环境友好转向无环境消耗, 并进行结构性变革。以习近平同志为核心的党中央为实现中华民族伟大复兴, 强调生态现代化建设的重要性。习近平生态文明思想与西方生态现代化理论有着本质区别, 不仅借鉴了西方在经济生态化、科技管理创新等方面的经验, 而且是对西方理论的超越, 表现为现代化的绿色发展, 坚持党的领导, 基于具体生态国情等多维度生态内涵^[5]。

2. 研究现状

国内对生态现代化的研究主要聚焦在社会学、经济学和环境科学领域。蒋正云^[4]采用综合评价法研究了中部地区农业现代化及经济、社会、生态三个子系统, 得出中部地区农业现代化发展的耦合协调关系不断优化的结论。李永卫等^[6]以西藏的“生态现代化”措施为例, 详细描绘了“生态现代化-绿色发展”的复合逻辑, 为相关理论实证提供了参考。

然而, 现有文献研究在这一领域有所不足。对于使用统计方法生态现代化发展水平定量分析的研究不够充分, 且部分研究仅停留在指标体系构建层面; 数据处理上, 传统对于面板数据的标准化方法通常局限在截面或个体单独对指标进行标准化, 而

无法同时研究不同个体在同一段时间的变化和相对关系，导致信息丢失；对于具有空间信息的数据集合的地区整体情况的计算，现有资料鲜见对多条时间序列进行综合考虑从而分析总体变化的研究，难以体现生态现代化发展水平。

本文创新性地提出了三个研究点：①通过构建生态现代化发展指数对生态现代化发展水平的定量分析，以及进行了时空尺度分析；②提出基于“截面-个体”的全局标准化方法，同时考虑了不同个体和不同时间段的变化和相对关系，捕捉了时间序列中的结构变化、异质性和相关性；③将卷积操作运用于生态现代化发展指数分析，揭示了城市群的

总体变化趋势，得到了全面且综合的测度结果。这些创新性研究为生态现代化领域提供了新的分析方法和综合评价手段，本文以珠三角为例对中国式生态现代化发展指数统计测度的研究，旨在填补现有文献中对于生态现代化发展水平定量分析的空白，具有重要的研究意义。

二、生态现代化指标体系构建

评价指标体系的构建结合学者郭鲁^[7]、李健^[9]等学者对生态现代化发展的评价体系的论述，涵盖经济生态、社会生态和环境生态准则层面，集成不同类型的领域层次，收集要素指标，对珠三角生态现代化进行测度，最终指标体系如表 1：

表 1 生态现代化指标体系

目标层	准则层	编号	领域层	编号	要素层	单位
生态现代化	V1 经济生态现代化	T1	经济总量	S1	人均地区生产总值	元
		T2	经济效率	S2	全社会劳动生产率	亿元/万人
		T3	收入水平	S3	第三产业产值占 GDP 比重	%
	V2 社会生态现代化	T4	城建	S4	城镇居民人均可支配收入	元
		T5	住房水平	S5	人均公园绿地面积	平方米
		T6	医疗规模	S6	城市化率	%
		T7	科技	S7	城市居民人均居住面积	平方米
		T8	教育	S8	医院数	个
		T9	碳汇	S9	卫生技术人员数	人
		T10	能源消耗	S10	R&D 经费占 GDP 比重	%
	V3 环境生态现代化	T11	水环境	S11	普通高等学校在校学生数	人
		T12	大气环境	S12	教育经费占 GDP 比重	%
				S13	森林覆盖率	%
				S14	万元 GDP 能耗	吨标准煤/万元
				S15	万元 GDP 电耗	千瓦时/万元
				S16	城市污水处理率	%
				S17	工业二氧化硫排放强度	千克/万元（GDP）
				S18	可吸入颗粒物（PM10）	毫克/立方米

生态现代化指标体系包含 3 个准则层 12 个领域层维度的 18 个指标，领域多元，客观准确，适用于生态现代化的统计测度。

三、研究过程

（一）数据预处理

1. 数据来源

从珠三角各地级市入手进行数据采集，选取珠三角 9 个城市 2007–2021 共 15 年 18 个指标的面板数据，通过权威数据库、网站及报告确保数据来源真实性。主要数据来源如表 2：

表 2 数据来源

广东统计信息网	http://stats.gd.gov.cn/
RESSET 统计建模大赛数据库	
中国区域研究数据支撑平台	http://cnrrd.szozdata.com/#/home
广东省生态环境厅	http://gdee.gd.gov.cn/
EPS DATA	https://www.epsnet.com.cn/index.html#/Index
《粤港珠江三角洲 区域空气监控网络监测结果报告》	
中国经济社会大数据研究平台	https://data.cnki.net/
珠三角各个城市对应的统计局及生态环境局	

其中部分指标数据展示如图 1：

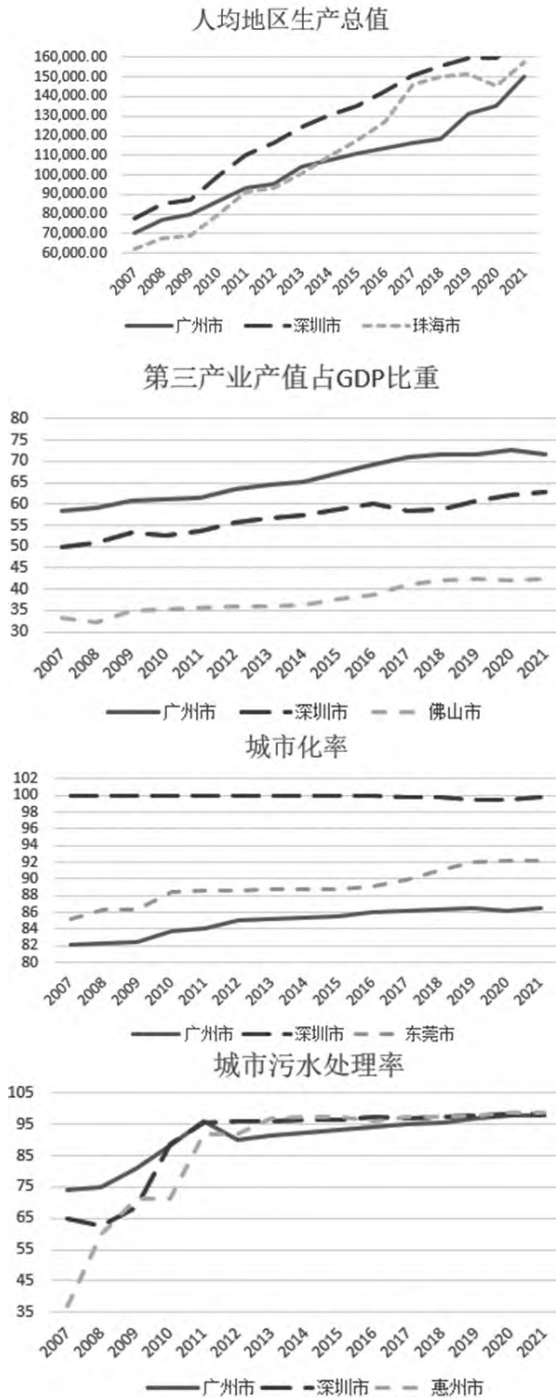


图1 数据结构

其中，极少部分年的某些指标数据未被披露，采用公式计算法得出：

s14：深圳、珠海、东莞、中山4市从2014年开始，不再统计s14，转而统计了该指标的增长率。用增长率换算得出s14在2014年到2021年的值为：

$$\text{单位GDP能耗}_n = \text{单位GDP能耗}_{n-1} \times (1 + \text{单位GDP能耗增长率}_n)$$

(1)

s7：实际新增居住面积计算人均居住面积存在缺漏，年鉴提供了市住宅面积，包含年住宅竣工面积、年住宅实际销售面积。分别计算进行对比，发现采用年住宅竣工面积计算指标值更接近序列平均且和相邻数据更平滑，故采用年住宅竣工面积计算人均居住面积。即：

$$\text{城市人均居住面积} = \frac{\text{城市居民居住总面积}_{n-1} + \text{住宅竣工面积}_n}{\text{城市居住人口}_n}$$

(2)

2. 缺失值处理

部分指标由于年份久远、披露透明度不足等原因，存在数据缺失，需对缺失值进行处理。将面板数据拆分为多个时间序列数据^[14]。对于不同年份的缺失数据，分别运用序列平均值法、线性插值法以及二次指数平滑法填补。

序列平均值法：利用平均值代替缺失数值，用于处于序列较前年份的数据。

线性插值法：若数据集中某个数据 x_n 缺失，则取其前后的数据点 $x_k, x_r, k < n < r$ 则该缺失数据可以用以下公式获得：

$$x_n = x_k + (x_r - x_k) \times (n - k) / (r - k)$$

(3)

二次指数平滑法^[12]：对于处在较后年份的数据，计算其二次平滑值，公式为：

$$x_{it}^{(1)} = \alpha x_{it-1} + (1 - \alpha) x_{it-1}^{(1)}$$

$$x_{it}^{(2)} = \alpha x_{it}^{(1)} + (1 - \alpha) x_{it-1}^{(2)}$$

$$\alpha_{it} = 2 x_{it}^{(1)} - x_{it}^{(2)}$$

$$\beta_{it} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} (x_{it}^{(1)} - x_{it}^{(2)})$$

$$x_{it+m} = \alpha_{it} + \beta_{it} m$$

(4)

$x_{it}^{(1)}, x_{it}^{(2)}$ 为第 i 个地级市第 t 年的一、二次指数平滑值， α_{it}, β_{it} 为第 t 个地级市的线性平滑参数， $x_{it}^{(1)}$ 为第 i 个地级市第 t 年的指标实际值， α 为线性平滑参数， x_{it+m} 为第 i 个地级市 $(t+m)$ 期的预测值。

根据不同数据的具体表现设置 α 的取值，以提高数据的准确性。结果如表3：

表 3 缺失值统计

指标	广州	深圳	珠海	佛山	江门	肇庆	惠州	东莞	中山
s1									
s2									
s3									
s4									
s5									
s6									
s7			2			1			1
s8									
s9									
s10									
s11									
s12									
s13									
s14									
s15									
s16				1					
s17					1			1	1
s18		1	1						

共存在 10 个缺失数据，已通过上述方法进行填充。经检验，与原序列不存在显著差异，适用后续实验。

3. 异常值检测

观测数据中可能包含离群异常点。基于 3σ 准则，剔除异常大小的值，进一步采用滑动四分位距法检验数据集。滑动四分位差距法^[13]通过估计数据集中可能的最大最小值，以判断异常值：

$$\begin{aligned} \min &= Q_2 - k \times IQR \\ \max &= Q_1 + k \times IQR \end{aligned} \quad (5)$$

Q_1 、 Q_2 为上下四分位数，上下四分位数之差 $IQR = Q_1 - Q_2$ 包含观测值的一半， k 的取值取决于数据对异常值的忍耐程度。检验的参数 k 和窗口大小随数据性质的不同而调整。最终共检出 34 个异常数据，单个序列至多存在 1-2 个异常。

经检验，大部分检出异常由于数据本身波动而产生，不属无效样本，经过筛查，认为这部分异常数据不存在真实性与非合理性错误，不剔除。中山的 s18、部分城市的 s7 等，由于数据未披露，采取缺失值填充。部分异常数据检测可视化及结果如表 4：

表 4 异常值统计

城市 指标	广州	深圳	珠海	佛山	江门	肇庆	惠州	东莞	中山
s1							1		1
s2									
s3									
s4			1						
s5		1		1					
s6						1			
s7							1	1	
s8				1		1	1		
s9									
s10				1	1	1		1	2
s11				2					2
s12						1			1
s13			2						
s14				1		1			
s15					1				1
s16		1							
s17			1						2
s18									1

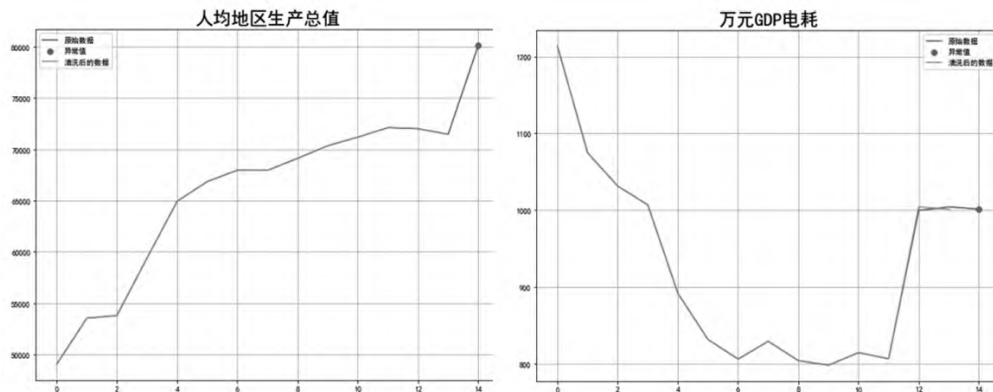


图 2 异常值检测

(二) 生态现代化发展的结构性断点考察

1. 珠三角地区经济发展情况概览

经济社会的稳定是中国生态现代化高质量发展的必要，为研究珠三角城市群经济生态现代化的动态特征，首先参考珠三角 GDP 增长量（GDP 的差分序列）的变化情况：

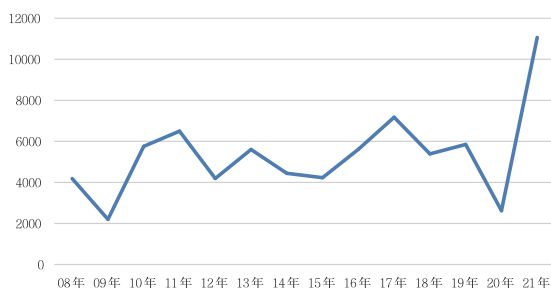


图 3a 近年珠三角地区 GDP 增长量（亿元）

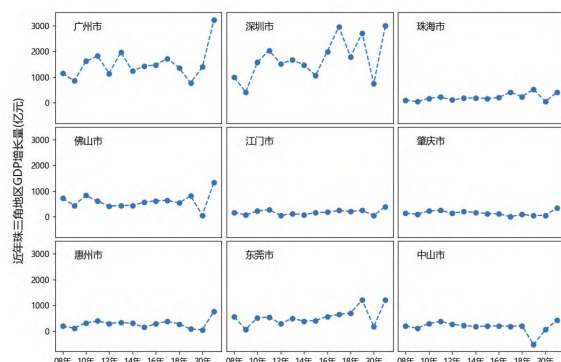


图 3b 近年珠三角地区 GDP 增长量（亿元）

在 2009 到 2019 年十年间，珠三角的 GDP 增长总体稳定，但也有不稳定波动。宏观上，2009 年遭受次贷危机的影响，2020 是新冠疫情全面爆发的年份，这些不稳定因素导致了国内外社会的经济健康发展。同时，2019 年的各市 GDP 增长量也出现了明显波动，具体是：2018 年到 2019 年除了深圳、中山外都呈现上涨，2019-2020 都出现了除了深圳、中山外都呈现下跌。深圳、中山的特殊性在之前年份也有所体现，应视为城市自身因素的作用导致。

2. 基于马尔可夫链的经济结构性断点考察

进一步对 2019 年前后的经济社会发展结构做出假设检验，以选择 2019 年作为代表性年份。中国式生态现代化发展需要以经济社会总体稳定作为前提，据此，我们做如下假设检验：

H_0 : 2019 年前后经济社会发展稳定

H_1 : 2019 年前后经济社会发展不稳定

为考察经济发展是否具有结构性变化，采用空间分布动态法考察各个城市发展水平的分布状况，

即通过各地的发展水平的相对情况来检验经济发展在时间维度的结构性断点^[11]。采用 2008-2019 年和 2019-2021 年各市 GDP 增长量与珠三角地区 GDP 平均增长量之比作为结构性断点的研究变量。

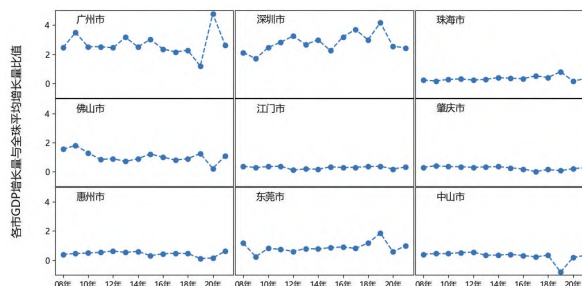


图 4 各市 GDP 增长量与全珠平均增长量比值变化图

(1) 转移矩阵的计算

基于马尔可夫链方法，首先分别对 2008-2019 年和 2019-2021 年的各市 GDP 增长量与珠三角地区 GDP 平均增长量比值计算状态转移概率矩阵：由数值大小设有 4 个状态，其中 p_{ij} 表示从状态转移 i 到状态 j 的概率，反映各市比值发生变动的概率，有

$\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1$ 。统计每个状态出现的次数： $\sum_{t=1}^T [s_t = i]$ ，统计每个状态间转移的次数： $\sum_{t=1}^{T-1} [s_t = i \cap s_{t+1} = j]$ ，计算转移概率矩阵 (p_{ij}) ，其中：

$$p_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} [s_t = i \cap s_{t+1} = j]}{\sum_{t=1}^T [s_t = i]} \quad (6)$$

其中， $[s_t = i]$ 表示当第 i 个状态时取 1，否则取 0。结果如表 5：

表 5 转移矩阵

时段	I	II	III	IV
2008-2019	0.89	0	0.11	0
	0	0.6	0.40	0
	0	0.6	0.40	0
	0	0	0.10	0.90
2019-2021	0.50	0	0.5	0
	1.00	0	0	0
	0.50	0	0	0.50
	0	0	0	1.00

(2) 转移矩阵的 Q 检验

构建马尔可夫链方法检验断点^[1]的 Q-统计量如下：

$$Q_i = \sum_{j \in B_i} n_i \frac{(p_{ij(2008-2019)} - p_{ij(2019-2021)})^2}{P_{ij(2019-2021)}} \sim \chi^2(B_i - 1)$$

$$Q = \sum_i Q_i \sim \chi^2\left(\sum_{i=1}^4 (B_i - 1)\right)$$

$$B_i = \{j: p_{ij(2019-2021)} > 0\}, p_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_j n_{ij}} \quad (7)$$

每个状态的 Q_i 都服从自由度为 $B_i - 1$ 的卡方分布, 其中 B_i 是状态 i 的出度。由卡方分布可加性,

$Q = \sum_i Q_i$ 服从自由度 $\sum_{i=1}^4 (B_i - 1)$ 的卡方分布。

检验的 Q 值为 12.796, 显著水平为 0.0123, 拒绝这两个时期 (2008 年-2019 年、2019 年-2021 年) 转移矩阵稳定的原假设, 表明各市 GDP 增长量与珠三角 GDP 平均增长量之比的状态转移存在显著差异, 即 19 年前后各市的经济地位变化速度突

增, 认为珠三角地区的经济社会总体发展发生显著变化。构建中国生态现代化的统计测度, 需要以经济社会总体平稳作为前提, 再以中国式生态现代化发展达到较高水平的年份作为衡量标杆。

选定 2019 年作为标杆年份, 这是由于经济社会在 2019 年之后开始受到疫情影响而剧烈波动, 同时 2019 年是十三五规划 (2016—2020 年) 的关键年份, 生态现代化有了长足的发展, 确定 2019 年作为生态发展指数的标杆年份, 为指标体系提供权重依据, 使得构建的生态发展指数更稳健。

(三) 生态现代化的统计测度

1. 指标权重的确立

(1) 2019 年珠三角指标概览

使用 2019 年的指标数据来确定各指标的权重, 该年指标数据概览如表 6:

表 6 2019 年各市指标

指标	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9
均值	101483.89	16.41	50.51	51171.03	18.76	82.18	36.78	105.11	58375.89
标准差	36945.24	4.92	9.57	10098.49	2.54	15.49	8.32	66.82	45760.55
极差	104706.78	13.99	29.94	31792.32	8.78	50.89	31.32	225.00	148283.00
指标	s10	s11	s12	s13	s14	s15	s16	s17	s18
均值	2.75	212467.00	2.50	41.32	0.38	738.73	98.05	0.18	0.04
标准差	0.97	330090.22	0.51	15.50	0.14	235.13	1.33	0.22	0.01
极差	3.83	1092973.00	1.68	50.18	0.54	658.14	4.48	0.75	0.03

(2) CRITIC 法确定权重

CRITIC 权重法^[2]由对比强度和冲突性来确定权重。对比强度使用指标的标准差 S_j 进行表示, 冲突性使用 $R_j = \sum_{i=1}^p (1 - r_{ij})$ 表示, r_{ij} 表示评价指标 i 和 j

之间的相关系数; 信息量 C_j 越大, 代表第 j 个指标在评价体系中的作用越大, 应分配更多权重:

$$C_j = S_j \times R_j \quad (8)$$

最终确定权重 w 如表 7:

表 7 CRITIC 权重

编号	要素层	指标变异性	指标冲突性	信息量	权重 (%)	方向
s1	人均地区生产总值	0.374	14.186	5.309	5.543	正
s2	全社会劳动生产率	0.373	14.066	5.246	5.476	正
s3	第三产业占 GDP 比重	0.339	13.745	4.657	4.862	正
s4	城镇居民人均可支配收入	0.337	14.215	4.789	5.000	正
s5	人均公园绿地面积	0.307	15.495	4.759	4.969	正
s6	城市化率	0.323	15.864	5.122	5.347	正
s7	城市居民人均居住面积	0.282	19.097	5.38	5.616	正
s8	医院数	0.315	13.643	4.297	4.486	正
s9	卫生技术人员数	0.327	13.555	4.437	4.632	正
s10	R&D 经费占 GDP 比重	0.268	15.218	4.078	4.258	正
s11	普通高等学校在校学生数	0.32	13.664	4.377	4.570	正
s12	教育经费占 GDP 比重	0.322	18.452	5.937	6.198	正

s13	森林覆盖率	0.328	17.976	5.89	6.149	正
s14	万元 GDP 能耗	0.269	18.929	5.094	5.318	负
s15	万元 GDP 电耗	0.379	22.005	8.338	8.705	负
s16	城市污水处理率	0.314	18.969	5.951	6.213	正
s17	工业二氧化硫排放强度	0.312	20.306	6.345	6.624	负
s18	可吸入颗粒物 (PM10)	0.373	15.509	5.78	6.034	负

2. 指标正向化和全局标准化

为全面客观地评价和分析各城市历年为生态现代化做出的努力,需要综合地考虑各个指标。s14, s15, s17, s18 为负向指标,做如下正向化,使之与其他指标同向变动:

$$s_j' = \frac{1}{s_j} \quad (9)$$

各指标量纲不同,为了有效地比较和分析各种变量、个体或时间点之间的差异和关系,面板数据经常需要进行标准化以消除因单位不同而产生的影响。现有的文献通常仅仅局限在对各截面或各个体单一地进行将指标标准化,这导致了无法同时地考虑这两个方面。

为了捕捉时间序列中可能存在的结构变化,又考虑不同个体之间的异质性和相关性,本文创新性地使用了基于截面-个体的全局最大最小标准化 (Global Min-Max Normalization), 相对于传统的最大最小标准化,本文采用的最大值和最小值同时考量了截面和个体两个维度,用面板中不同时间不同个体的该指标的最大值最小值来代替进行全局标准化。

对于正向化后的指标向量

$$x_{year, city} = \begin{pmatrix} s_{1_{year, city}} \\ s_{2_{year, city}} \\ \dots \\ s_{18_{year, city}} \end{pmatrix}, \text{有:}$$

$$\max^{(j)} = \max_{y \in year, c \in city} x_{y, c}^{(j)}$$

$$\min^{(j)} = \min_{y \in year, c \in city} x_{y, c}^{(j)}$$

$$n_{y, c}^{(j)} = \frac{x_{y, c}^{(j)} - \min^{(j)}}{\max^{(j)} - \min^{(j)}} \quad (10)$$

得到全局最大最小标准化指标向量 $n_{year, city}$, 用于后续发展指标体系的构建中。

3. 生态现代化发展指数的构建

定义 f_{EMDI} 为指标向量 $x_{t, city}$ 到生态现代化发展指数 (Ecological modernization development index) $e_{t, city}$ 的一个映射:

$$f_{EMDI}: \begin{pmatrix} x_{2007, 广州} & \dots & x_{2007, 中山} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{2021, 广州} & \dots & x_{2021, 中山} \end{pmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{pmatrix} e_{2007, 广州} & \dots & e_{2007, 中山} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{2021, 广州} & \dots & e_{2021, 中山} \end{pmatrix}$$

$$\text{其中 } x_{t, city} = \begin{pmatrix} s_{1_{t, city}} \\ s_{2_{t, city}} \\ \dots \\ s_{18_{t, city}} \end{pmatrix} \text{ 为经过正向化和全局最}$$

大最小标准化的各市当年的指标值,由前文得到。

计算各市当年的发展指数,必须结合权重 w 来综合地衡量各指标,本文使用线性组合即向量乘法来构建生态现代化发展指数 $E_{t, city}$ (以下简称 Emdi 指数):

$$E_{t, city} = w \cdot x_{t, city} = (W_1, W_2, \dots, W_{18}) \begin{pmatrix} s_{1_{t, city}} \\ s_{2_{t, city}} \\ \dots \\ s_{18_{t, city}} \end{pmatrix} \quad (11)$$

该指标直观地体现了各地区各时期的生态现代化发展,该评价体系对指标数值变化敏感,计算方法简单易用,适用范围广。由于各个权重没有非常大的数值差异,使用高维计量方法的综合性优点不突出,同时因指标维度较高,高维计量方法对某个指标数值变动不够敏感。因此相比与优劣解相对距离算法 (TOPSIS) 或其他高维综合算法,使用线性组合构建 Emdi 指数 $e_{t, city}$ 在实际应用中具有说明性,更能提供指导意见。

对每一年各市进行发展指数的测度计算,呈现

如图 5 所示：

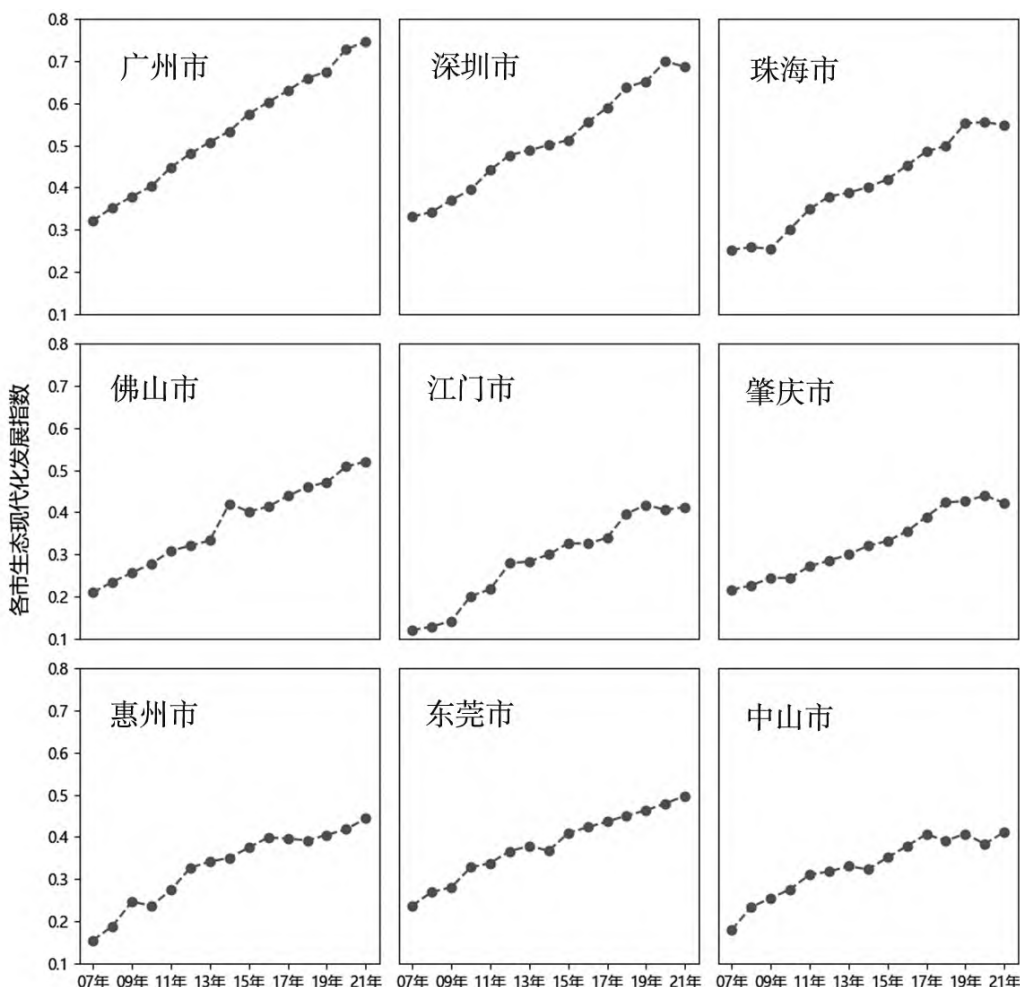


图 5 生态现代化发展指数

(四) 生态现代化发展指数的时空尺度分析

由图 5，从整体趋势来看，所有城市的生态现代化发展指数都逐年增长，处于一个良好的发展态势。2007 年到 2009 年期间，城市生态现代化发展相对缓慢；但之后开始逐渐加速，在 2010 年之后，整体上呈现井喷式增长的态势，以中山市和惠州市增速最快。在 2011 到 2021 年期间呈现出稳步增长，螺旋上升态势，其中有些城市如深圳市的增长幅度非常显著。2013 年至 2015 年期间，各地进入稳定增长阶段，城市呈现出更多的稳健特征；而 2018 年到 2020 年之间呈现出一定的波动和下滑，Emdi

指数发展放缓。

珠三角各城市之间存在发展不平衡的问题：其中广州和深圳的生态现代化发展指数遥遥领先于其他 7 市，加强政策制定和措施执行，挖掘城市潜力，不断提高珠三角地区整体的生态文明水平，是未来该地区可持续发展的重要方向。

1. 城市生态现代化发展活力衡量

发展活力反映了生态现代化发展面貌，对各个城市的 Emdi 指数差分序列的进行分析，来衡量城市生态现代化发展活力。

$$\Delta e_{c,t} = e_{c,t} - e_{c,t-1} \quad (12)$$

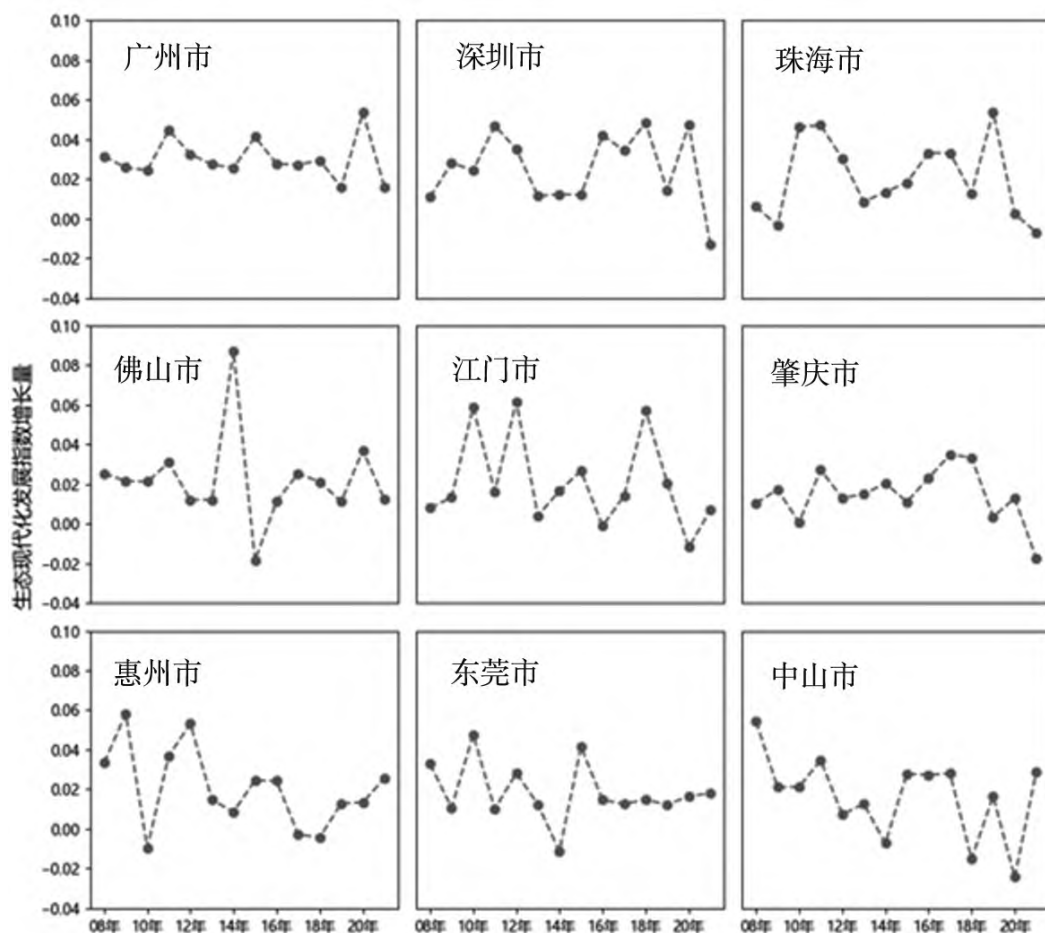


图6 差分序列图

差分序列基本为正, 各市的 Emdi 指数基本呈现增长; 时间上波动较为剧烈, 生态现代化发展仍在探索。差分序列的标准差 s_{city} 越大, 说明该城市越具生态现代化发展活力, 走在生态现代化发展的更前沿, 该城市的经验越具有参考意义。故定义生态现代化发展活力为该城市 Emdi 指数年增长量的标准差, 即:

$$s_{city} = \sqrt{var(e_{city})} \quad (13)$$

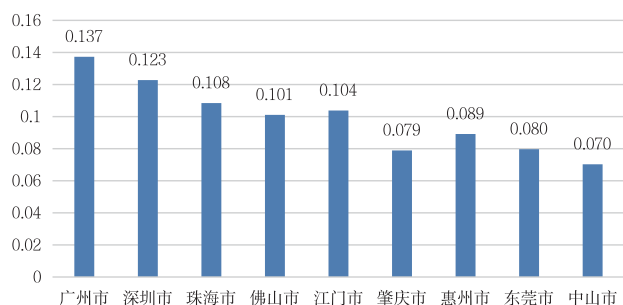


图7 生态现代化发展活力

各城市之间在生态现代化发展活力上存在较大的差距, 提示我们要关注不同城市的发展状况, 采取针对性的政策措施, 促进协调的生态现代化发展, 缩小城市之间的发展差距。同时, 还需要进一步挖掘生态现代化发展的动力因素, 激发城市的内生发展活力。

2. 生态现代化发展指数分布动态演进

核密度动态演进法^{[10][11]}是一种用来估计概率密度函数的非参数统计方法, 旨在有效地捕捉数据分布的特征。给定样本 x_i , 核密度估计法的概率密度函数估计式为:

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (14)$$

$\hat{f}_h(x)$ 表示概率密度估计值, h 是带宽参数, 决定了估计出的概率密度函数的平滑程度, 通过交叉验证法选择 $h = 0.25$, K 选择高斯核函数, 得到概率密度估计如图 8:

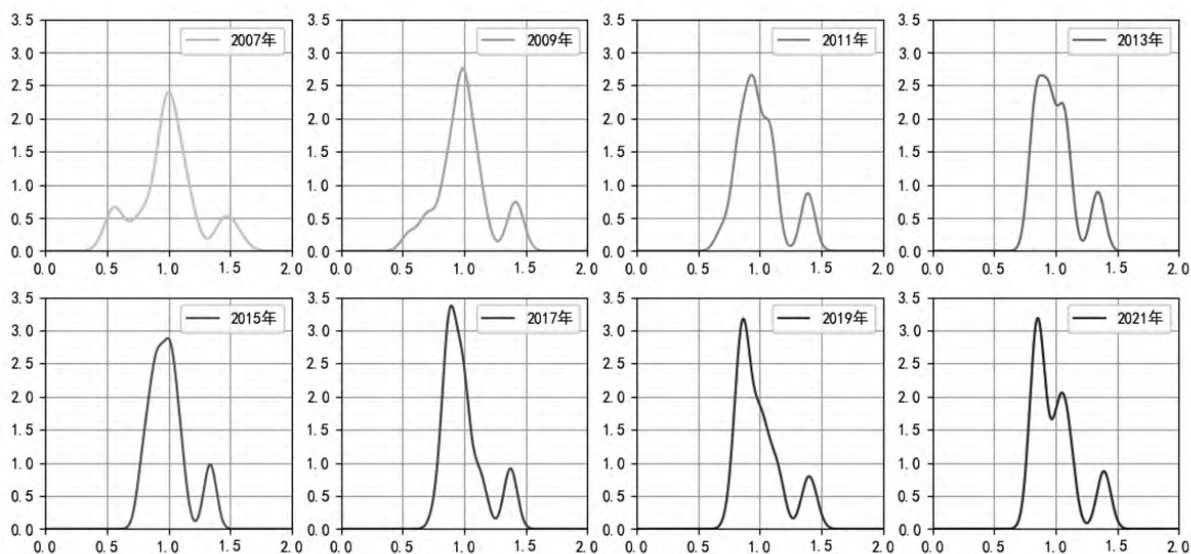


图8 核密度图

核密度图展示了珠三角各市 Emdi 发展水平的叠加效应,横轴表示 Emdi 指数与平均水平比值,纵轴表示核密度值。核密度波峰表示了生态现代化的城市群效应,随着时间发展,波峰呈现分散到聚拢再分散的趋势。尖顶的移动表示出较落后的城市在 2009 年前后并入发展水平居中的中坚力量,先进城市稳步领跑,中坚集群偶见突出个体。中坚城市群峰顶逐渐收尖,位置跨越均值向左移动,表明主峰内部城市间的发展情况差距波动递减,且中坚城市群的发展水平在全珠三角的地位逐步下降。右次峰波即先进城市集群的顶峰高度近年来出现下降,先进城市间的差异正在加大,而峰顶右移说明占全珠地位提高。广州深圳为主的先锋城市发展喜人,显著高于平均水平,发展情况相似的中坚城市群发展稳健,其中的积极分子也体现出加速跟跑的步伐。

3. 珠三角地区空间总体生态现代化发展测度

考虑对城市群总体进行统计测度,学术界鲜见此类似不同个体的时间序列综合效应的测度方法,本文创新地提出将卷积操作运用于珠三角城市的 Emdi 指数,测度该地区总体的生态现代化发展,反映出时间序列整体的变化趋势,得到综合全面的测度结果。

对于 9 市 Emdi 序列 e_1, e_2, \dots, e_9 进行 valid-mode 卷积的数学公式可以表示为:

$$(e_1 * e_2 * \dots * e_9)(s) =$$

$$\sum_{\tau_1=0}^{m_1-1} \sum_{\tau_2=0}^{m_2-1} \dots \sum_{\tau_9=0}^{m_9-1} e_1(\tau_1) e_2(\tau_2) \dots e_9(\tau_9) \delta(n - \tau_1 - \tau_2 - \dots - \tau_9 + 8) \quad (15)$$

其中, $*$ 表示卷积运算符, m_i 表示第 i 个序列的长度, $\delta(x)$ 表示 Kronecker Delta 函数,即:

$$\delta(x) = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases} \quad (16)$$

对于输出序列中的每个样本点都包含了各市的 Emdi 指数,得出珠三角城市群生态现代化发展指数:

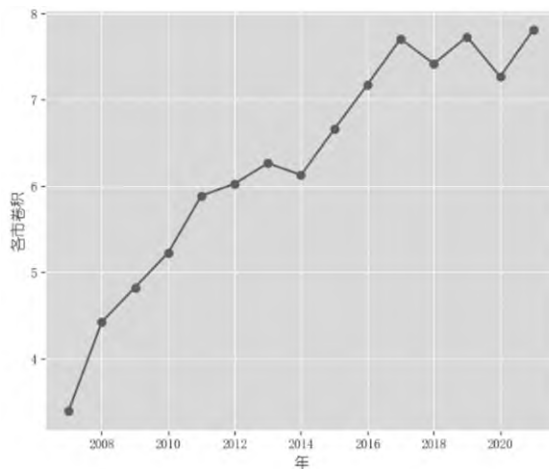


图9 珠三角城市群 Emdi 指数

根据图 9 示,珠三角城市群的生态现代化在过去 15 年间发展迅速,取得优异成果。而曲线仍有

波动：2011 年到 2014 年发展放缓，直到 2015 年开始高速发展，再又进入 2018 到 2021 的波动期。在这些时段，全国各省市也受到宏观社会不稳定性因素的影响，对中国式生态现代化发展提出了挑战。在各市进入到生态现代化发展阶段性饱和的阶段（2011）的同时，珠三角城市群生态现代化发展随之放缓；2015 年，科技发展突出、发展新动能加快成长、产业结构调整取得积极进步。这些因素共同促进了全球三角生态现代化水平的回升，尽管在具体城市的 Emdi 数值上没有显著波动，但卷积操作捕捉到了这些微妙变化。同时，卷积操作也捕捉到了从 2018 开始的宏观社会不稳定性^[15]，表现出城市群生态现代化发展水平的剧烈波动。

虽然时间序列卷积操作的数理性质和现实意义需要在更广泛的范围内进行论证和证明，但是从珠三角城市群的表现来看，它提供了一定的现实意义和价值参考，对珠三角乃至全中国的生态现代化发展做出重要的探索。

（五）生态现代化多维度分析

1. 准则层获取

考虑三个准则层（维度）的发展情况，对每个维度拆解指标，首先需计算各指标权重：熵权法赋权考虑了各指标信息熵，分别对三个准则层进行赋权，将所得权重记为 w_i ，对应准则层的指标采用加权平均计算得出，表 8 展示赋权结果：

表 8 熵权法对 V_i 赋权

V1 经济		V2 社会		V3 环境	
项	权重 (%)	项	权重 (%)	项	权重 (%)
s1	22.196	s5	7.763	s13	23.319
s2	29.029	s6	4.817	s16	13.395
s3	35.41	s7	6.177	s14	10.34
s4	13.365	s8	16.205	s15	29.593
		s9	18.213	s17	9.305
		s10	6.054	s18	14.047
		s11	35.388		
		s12	5.384		

加权平均得对应的准则层测度 V_i （ n 为对应生态现代化维度 V_i 所含指标个数）：

$$V_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i s_i \tag{17}$$

2. PVAR 模型的构建

PVAR 面板自回归向量模型可兼顾多元回归模型和相关变量滞后影响动态关系的非结构化模型，同时考虑多个变量，不仅能较好地预测未来多个时期的值，而且捕捉多变量彼此之间的联动效应，对于政策现状和决议能够起到较为显著的调和分析和对比参考作用^[14]。为探究经济、社会、环境生态三准则层维度之间的影响作用关系，基于 PVAR 模型分析三个维度之间的协调联系和促进效用。

（1）平稳性检验

首先对面板指标进行平稳性 IPS 单位根检验。对 V_i 和 Emdi 指数整理为面板数据，分别进行单位根检验。四个序列数据项的 IPS 检验 P 值均远小于 0.01，故拒绝原假设，认为数据不存在同期性影响，四项时间序列数据均为平稳序列，适于后续研究。

表 9 IPS 检验结果

项	V1	V2	V3	Emdi
P-value	3.786e-10	2.2e-16	2.2e-16	1.204e-14

（2）最大滞后阶数的确立

对面板数据进行 GMM-PVAR 分析以确定最优滞后期，基于 AIC、BIC、HQIC 三个信息准则量化模型的拟合优度，信息准测的值越小，表示模型的拟合效果与复杂度综合越优。由表 10，在 5%的置信水平下，选择滞后阶数为 1 阶的 PVAR 模型。

表 10 最大滞后阶数的确立

信息准则阶数	AIC	BIC	HQIC
1	-888	-2066.358	-1433.769
2	-848	-1907.919	-1339.193
3	-776	-1675.185	-1191.787

（3）模型稳定性检验

基于模型的特征根对模型进行稳定性检验。计算得所有特征值均在单位圆内，故建立的 PVAR 自回归模型稳定，适合进行深入研究。

表 11 模型特征值

特征值	实部	虚部
V1	0.7113	0
V2	0.4577	0
V3	0.0114	+0.2313
Emdi	0.0114	-0.2313

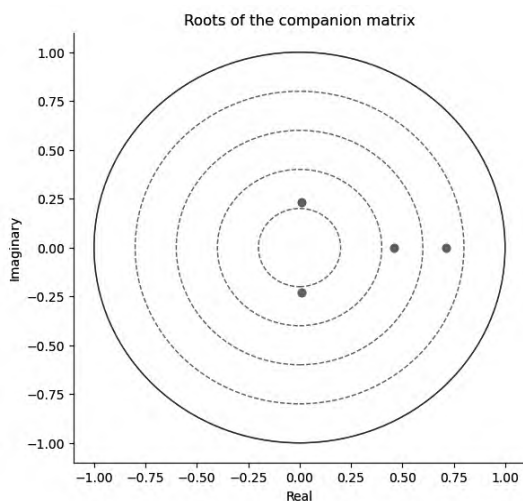


表 10 模型特征值

(4) 模型估计结果过度识别检验

检验模型的误差结构，包括异方差性、自相关等。进行 Hansen-J 组合检验变量是否满足零假设。

Hansen-J 组合统计量的值接近零，有 93.7% 的把握接受原假设，认为引入的工具变量能够较好地解决回归模型中的内生性问题，模型有效。

表 12 模型估计过度识别检验

hansen_ j_ test			
statistic	p value	parameter	nof instruments
-5.191887e-13	0.937	352	400

(5) 脉冲响应分析

为深入研究并具象化展示指标数据之间相互影响关系，分别对 V1、V2、V3 及构建的 EmdI 指数进行脉冲响应分析 (Impulse Response Analysis)。反映其他变量保持不变的情况下，一个变量受另一变量影响的动态响应路径。在 VAR 框架下进行模型阶跃函数的计算，刻画在 VAR 模型误差项各向异性下各个自变量单位冲击一个单位涨落后对自身和其他变量短期和长期的影响。分别对 4 项数据的脉冲响应分析结果如下：

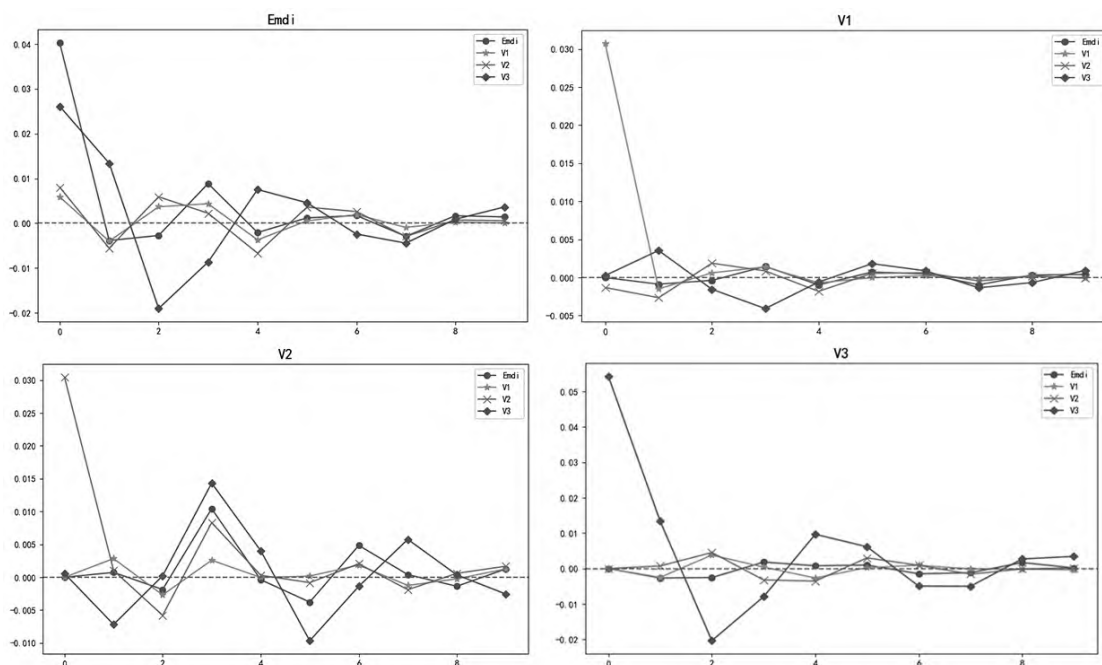


图 11 脉冲响应分析

每个变量的脉冲响应图的每一行表示表同一冲击对不同变量的影响，每一列代表不同冲击对同一变量的影响。

①生态现代化发展对自身具有较强的正向影响，受 3 个生态影响且环境影响较大。表明经济和社会维度的发展对于环境维护具有一定的指导

意义。

②社会维度受生态现代化发展影响非常小，而受环境维度的影响波动较大，但在特定时滞下或表现出显著的正向影响。而社会生态对自身具有较大的正向影响，但可能受到部分因素造成的负向影响。

③环境生态受生态现代化发展的影响较小。受经济生态的影响波动较大，但在特定时滞下或表现出显著的正向影响。而社会生态对环境生态的影响相对较小，而环境生态对自身具有较大的正向影响。

④生态现代化发展指数 Emdi 对所有其他变量的影响相对较为平均，尤其对经济的影响最小。这可能意味着 Emdi 指数对各领域生态现代化的瞬时响应较为均衡，在政策决议时需要考虑多个方面的因素。

四、结论和建议

（一）研究结论

1. 生态现代化发展走向

珠三角地区各城市的生态现代化发展指数呈稳步上涨，展现了该地区生态现代化发展的良好态势。2011 到 2021 年，珠三角城市群生态现代化发展表现为“缓-快-缓”的螺旋上升。具体地，2011 年到 2014 年珠三角城市群生态现代化发展放缓，直到 2015 年开始高速发展，再又进入 2018 到 2021 年的波动期。如今全球贸易放缓、全球通胀等宏观社会不稳定性因素对中国式生态现代化发展提出了新的挑战。回顾发展历程，科技创新、发展新动能的快速成长、产业结构的调整等措施，帮助珠三角乃至全国有效地应对这些风险与挑战，带来全新的机遇与发展。

2. 珠三角生态现代化发展结构优，活力好

珠三角地区生态现代化发展分布结构优良，呈现出 2 个发展集群。广州深圳为先锋城市，昂扬领跑；其他城市属中坚力量，为全珠发展提供稳定支撑；珠三角未见显著落后的城市，生态现代化发展不掉队。珠三角地区生态现代化发展态势活泼积极，稳中有进。先锋城市昂扬领跑，领先优势有所扩大，同时广州深圳竞争激烈；中坚力量发展均衡化，同时出现积极个体加速拔高。中国式生态现代化发展有均衡，有活力，体现中国速度、中国温度。

3. 生态现代化维度

生态现代化发展涵盖经济、社会、环境多个方面，受到多维度因素共同作用。生态现代化发展受经济生态的较大影响，受到社会生态和环境生态的

较小影响。同时经济发展也会带动社会和环境的发展，社会与生态的发展之间在特定期呈现负向关系，但与环境生态现代化之间呈现正向关系。此外，各维度以及生态现代化发展指数本身对自己的发展具有积极影响。

（二）政策建议

1. 推动资源共享，实现协同发展

珠三角地区的生态现代化发展存在明显的城市群效应，各城市群之间在生态现代化发展活力上存在不平衡不充分。政府要利用好城市群效应，按照区域功能定位和实际发展水平划分，鼓励先锋，稳住中坚，扶持落后，做到分类精准施策，推动形成精准有效的空间发展格局；同时，应积极搭建区域生态现代化发展联动平台，发挥优势地区的领头羊作用，统筹资源整合共享，促进优质资源向落后地区溢出，缩小城市间的生态现代化发展程度差距。契合“协调共享”新发展理念，构建高质量发展新格局，提升整体生态文明水平。

2. 把握发展形势，科学宏观调控

贸易保护、地缘危机、全球通胀等宏观社会不稳定性因素对中国式生态现代化发展提出了艰巨挑战。要采取科学的现代化统计测度方法，把握发展进程，通过信息、统计技术等手段满足数据需求，建立多指标体系，多模型协同的框架，及时掌握生态现代化发展动向，运用宏观工具调控保障中国式现代化行稳致远。

3. 注重维度平衡，把握协调发展

政策决议时，对于环境生态的发展，应当更加关注经济发展对其影响，制定积极的经济环境政策来调和。制定社会政策时应积极利用社会生态对自身的积极影响，经济、社会两个维度是相辅相成、共同发展的。同时，社会生态往往需要依赖于环境保护和经济可持续发展，需要政府在经济依赖性和环境保护之间寻求平衡。此外，环境生态对社会和经济的可持续发展起到一定正向作用，作为中国生态现代化的重要组成维度。政策决议时需加强环境保护和生态恢复，将环境生态现代化作为关键领域，注重“绿色”新发展，积极响应习总书记“绿水青山就是金山银山”的号召。

4. 激发动力因素，踔厉奋发前行

针对目前经济、社会、环境发展的不充分，政府要着眼经济、社会、环境三大维度，着力产业结构、企业创新、绿色生活、生态保护、城市规划、科技进步、人才引进等抓手，推动高质量新发展，

充分激发中国式生态现代化活力。贯彻新发展理念，构建新发展格局，向生态现代化强国踔厉奋发。

参考文献：

- [1] Bickenbach F, Bode E. Markov or not Markov – this should be a question[J]. Kiel Working Papers, 2001.
- [2] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method [J]. Computer Ops Res, 1995, 22: 763–770.
- [3] 李莉. 生态现代化研究[D]. 北京交通大学, 2017.
- [4] 蒋正云, 周杰文, 赵月. 乡村振兴背景下中部地区农业经济—社会—生态现代化时空耦合协调关系研究[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(06): 99–108.
- [5] 王茹俊, 王丹. 中国式现代化的生态意蕴及其推进路向[J]. 北京科技大学学报(社会科学版), 2024, 40(01): 11–18.
- [6] 鞠传国, 李永卫. 西藏生态文明经济的“生态现代化—绿色发展”复合模式[J]. 青海社会科学, 2023, (01): 49–54.
- [7] 郭鲁. 论生态现代化评价指标体系的构建[J]. 中国集体经济, 2014(33): 53–55.
- [8] 郇庆治, 马丁·耶内克. 生态现代化理论: 回顾与展望[J]. 马克思主义与现实, 2010(01): 175–179.
- [9] 李健, 李彦霞, 张杰. 三大城市群绿色竞争力指数测度及演化分析[J]. 统计与决策, 2022, 38(20): 93–97.
- [10] 郑玉雯, 薛伟贤. 丝绸之路经济带生态环境风险评估及发展趋势预判[J]. 中国软科学, 2022(02): 95–104.
- [11] 李国平, 陈晓玲. 中国省区经济增长空间分布动态[J]. 地理学报, 2007(10): 1051–1062.
- [12] 黄炜达, 朱维骏, 蓝映彬. 基于二次指数平滑法的能源分析预测方法[J]. 节能与环保, 2023(02): 63–65.
- [13] 杨可可, 刘立龙, 陈军. 基于滑动四分位距法的地震期间电离层 TEC 异常[J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39(02): 427–432.
- [14] 刘诗琦, 彭晴, 王奕雯等. 四川省绿色新动能的统计测度及经济效应研究——基于 PVAR 模型[C]//中国统计教育学会, 教育部高等学校统计学类专业教学指导委员会, 全国应用统计专业学位研究生教育指导委员会. 2021年(第七届)全国大学生统计建模大赛获奖论文集(二). 2021: 1645–1682.
- [15] 李克强. 政府工作报告[N]. 人民日报, 2020–05–30(001).